

ЗАХВАТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РЕЖИМ НЕОГРАНИЧЕННОГО УСКОРЕНИЯ ПРИ СЕРФИНГЕ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Николай Ерохин¹, Елена Филонова¹, Пламен Тренчев², Румен Шкевов²

¹*Институт космических исследований – Российская Академия Наук*

²*Институт космических исследований – Болгарская Академия Наук*
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

CHARGED PARTICLES CAPTURE WITH UNLIMITED ACCELERATION REGIME DURING ELECTROMAGNETIC WAVE SURFING IN MAGNETIC FIELD

Nikolay Erokhin¹, Elena Filonova¹, Plamen Trenchev², Roumen Shkevov²

¹*Space Research Institute - Russian Academy of Sciences*

²*Space Research Institute - Bulgarian Academy of Sciences*
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Ключевые слова: Электромагнитная волна в плазме, внешнее магнитное поле, захват частиц волной, ускорение зарядов, механизм серфинга, ультрарелятивистские энергии, фаза волны, интеграл движения, нелинейное уравнение, критическая амплитуда волны, темп ускорения

Key words: Electromagnetic wave in plasma, external magnetic field, capture of particles by wave, charge acceleration, highly relativistic energy, wave phase, integral of motion, nonlinear equation, threshold wave amplitude, energy growth rate

Аннотация: Аналитически и численно изучена динамика захвата и последующего ускорения частиц электромагнитной волной конечной амплитуды, распространяющейся в плазме поперек внешнего магнитного поля, с учетом вихревой компоненты поля волны. Анализ ускорения выполнен на основе нестационарного, нелинейного уравнения второго порядка для фазы волны на траектории захваченного заряда. Определен диапазон начальных фаз волны, в котором происходит захват заряда в режим неограниченного ускорения. Изучена зависимость границ этого диапазона фаз от величины внешнего магнитного поля при фиксированной фазовой скорости. Исследована динамика компонент импульса и скорости ускоряемой частицы.

Abstract: A particles capture and their following acceleration by an electromagnetic wave with finite amplitudes is studied, where the wave propagates in plasma across an external magnetic field, taking into into account vortex component of the wave field. The analysis of charge acceleration is performed on the basis of the second order of nonstationary, nonlinear equation for the wave phase at the trapped particle trajectory. It is determined the range of wave phases in which the particle capture with their following acceleration takes place. It is studied the dependence of this range boundaries on the external magnetic field magnitude for the wave phase velocity given. The temporal dynamics of accelerated particle impulse and its velocity is investigated.

Исследование процессов формирования потоков быстрых частиц относится к числу актуальных задач физики космической плазмы и, в частности, представляет большой интерес для проблемы генерации космических лучей в астрофизике. Одним их механизмов генерации потоков релятивистских частиц в астрофизике является серфинг зарядов на электромагнитных волнах, который рассматривался ранее, например, в работах [1-4] и реализуется для амплитуды волны выше некоторого порогового значения. При этом для корректной оценки количества ускоренных частиц, их энергетических спектров необходим детальный анализ условий захвата заряженных частиц в режим сильного ускорения, определение благоприятных для захвата фаз волны и скоростей зарядов. Эти вопросы рассмотрены численно в настоящей работе для серфинга зарядов на электромагнитной волне с заданной амплитудой, распространяющейся в плазме поперек внешнего магнитного поля, с учетом непотенциальности волнового поля. Исходными являются релятивистские уравнения движения частицы, имеющие интеграл движения. Дальнейший анализ проводится на основе

нелинейного уравнения второго порядка для фазы волны на траектории ускоряемой заряженной частицы.

В работе для набора фиксированных значений фазовой скорости волны, меньших скорости света в вакууме, численно исследована зависимость границ диапазона благоприятных (для захвата в режим сильного ускорения зарядов) начальных фаз от величины внешнего магнитного поля при амплитудах волны, близких к пороговой. Рассмотрена временная динамика компонент скорости и импульса ускоряемого заряда. В пределе ультрарелятивистских энергий частицы изучены асимптотики для ее импульса, темпа ускорения и других параметров задачи.

Рассмотрим распространение электромагнитной волны в холодной магнитоактивной плазме пренебрегая слабой диссипацией. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси z : $\mathbf{H}_0 = H_0 \mathbf{e}_z$, монохроматическая электромагнитная волна распространяется поперек магнитного поля с электрическим полем вида $\mathbf{E} = \text{Re } \mathbf{A} \cdot \exp(i\Psi)$, где $\Psi = \omega t - kx$, \mathbf{A} – амплитуда.

Для удобства последующего изложения введем следующие обозначения для безразмерных величин: $u = \omega_{He} / \omega$, $v = (\omega_{pe} / \omega)^2$, $N = ck / \omega$, где $\omega_{He} = e H_0 / m c$ – гирочастота электронов плазмы, N – показатель преломления, $\omega_{pe} = (4\pi e^2 n_0 / m)^{1/2}$ – электронная ленгмюровская частота.

Рассмотрим теперь релятивистское ускорение электронов в плазме монохроматической электромагнитной волной р-поляризации, распространяющейся поперек магнитного поля \mathbf{H}_0 . Для компонент поля волны примем следующие выражения:

$$(1) \quad E_x = E_0 \cdot \cos \Psi, \quad E_y = \chi \cdot E_0 \cdot \sin \Psi, \quad H_z = N \cdot \chi \cdot E_0 \cdot \sin \Psi,$$

где $\Psi = \omega t - kx$, $\chi = \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_c$, параметр χ характеризует непотенциальную часть электрического поля волны, ε_{\perp} , ε_c компоненты тензора диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы. Запишем релятивистские уравнения движения для импульса ускоряемого электрона \mathbf{p}

$$(2) \quad dp_x / dt = -e E_x - e v_y (H_0 + H_z) / c, \quad dp_y / dt = -e E_y + e v_x (H_0 + H_z) / c, \quad dp_z / dt = 0.$$

Таким образом $p_z = \text{const}$. Для анализа системы уравнений (1) удобно ввести безразмерные переменные $\tau = \omega t$, $\xi = kx$, безразмерные скорость $\beta = v / c$ и амплитуду волны $\sigma = e E_0 / m c \omega$. Заметим, что $\beta_x = \beta_p [1 - (d\Psi / d\tau)]$, а импульс электрона равен $p = m c \gamma \beta$, где $\gamma = 1 / (1 - \beta^2)^{1/2}$ – релятивистский фактор.

Теперь релятивистские уравнения движения электронов (2) принимают окончательный вид:

$$d(\gamma \beta_x) / d\tau = -\sigma \cos \Psi - (u + \sigma N \chi \sin \Psi) \beta_y, \quad d(\gamma \beta_y) / d\tau = -\sigma \chi \sin \Psi + (u + \sigma N \chi \sin \Psi) \beta_x,$$

$$(3) \quad d(\gamma \beta_z) / d\tau = 0, \quad \gamma \beta_z = \text{const}.$$

Из системы уравнений (3) для темпа ускорения частицы получаем

$$(4) \quad d\gamma / d\tau = -\sigma (\beta_x \cos \Psi + \chi \beta_y \sin \Psi).$$

Используя уравнения (3), (4) находим интеграл движения для ускоряемого электрона

$$(5) \quad J = \gamma \cdot \beta_y + u \cdot \beta_p \cdot (\Psi - \tau) - \sigma \cdot \chi \cdot \cos \Psi = \text{const}.$$

С учетом (5) выпишем выражение для релятивистского фактора γ и компоненты скорости заряда β_y

$$(6) \quad \gamma = \{ 1 + g_z^2 + [J + \sigma \chi \cos \Psi + u \beta_p (\tau - \Psi)]^2 \}^{1/2} / (1 - \beta_x^2)^{1/2},$$

$$\beta_y = [J + u \cdot \beta_p \cdot (\tau - \Psi) + \sigma \cdot \chi \cdot \cos \Psi] / \gamma.$$

Здесь $g_z = \gamma \beta_z = \text{const}$. Анализ ускорения зарядов удобно проводить в рамках вытекающего из (3)-(6) нелинейного уравнения для фазы волны на траектории электрона

$$(7) \quad d^2 \Psi / d\tau^2 - [\sigma (1 - \beta_x^2) / \gamma \beta_p] \cos \Psi - (u \beta_y / \gamma \beta_p) + [\sigma \chi \beta_y (\beta_x - N) / \gamma \beta_p] \sin \Psi = 0.$$

Начальные данные для решения уравнения (7) берем в виде $\Psi(0) = \Psi_0$, $\Psi_\tau(0) = \alpha$. Соответственно имеем $\beta_x(0) = \beta_p \cdot (1 - \alpha)$. Введем компоненты безразмерного импульса частицы $g_x = \gamma \beta_x \equiv h$, $g_y = \gamma \beta_y \equiv g$, $g_z = \gamma \beta_z$. Пороговое значение безразмерной амплитуды волны определим формулой $\sigma_{\text{крит}} = u \gamma_p$, где $\gamma_p = 1 / (1 - \beta_p^2)^{1/2}$ релятивистский фактор ускоряющей волны. Захват заряженной частицы в режим неограниченного ускорения происходит при амплитудах волны $\sigma > \sigma_{\text{кри}}$. Нелинейное уравнение (7) решалось численно с указанными выше начальными данными.

Для нахождения диапазона начальных фаз $\Psi_{\text{мин}} < \Psi_0 < \Psi_{\text{макс}}$, при которых происходит захват заряда в режим неограниченного ускорения волной, фиксировалась фазовая скорость волны β_p , причем согласно изложенному выше полагалось $0 < \beta_p < 1$. Затем, при заданной фазовой скорости волны $\beta_p = [(v + u^2 - 1) / (1 + u - v) \cdot (u + v - 1)]^{1/2}$ меняя безразмерную гирочастоту электрона u из интервала $0 < u < 1$ вычисляем безразмерную плотность плазмы v по формуле

$$v = 1 - [2 \cdot u^2 \cdot (1 - \beta_p^2)] / [1 + (1 - 4 \cdot u^2 \cdot \beta_p^2 + 4 \cdot u^2 \cdot \beta_p^4)^{1/2}].$$

Амплитуда волны σ выбиралась чуть выше порогового значения $\sigma_{\text{крит}}$. Затем численными расчетами определялся диапазон начальных фаз, в котором имел место захват заряда в режим неограниченного ускорения волной, изучались временная динамика фазы $\Psi(\tau)$, компонент импульса и скорости захваченных частиц, релятивистского фактора $\gamma(\tau)$, темпа ускорения $d\gamma / d\tau$. Результаты расчетов этих характеристик представлены на рис.1–рис.5 при малой надкритичности для амплитуды ускоряющей волны, когда $\sigma = 1.1 \cdot \sigma_{\text{крит}}$. Из расчетов следует, что при заданной фазовой скорости ускоряющей волны β_p с увеличением внешнего магнитного поля (параметр u) диапазон начальных фаз, в котором имеет место захват заряда в режим неограниченного ускорения волной, расширяется. Диапазон начальных фаз $\Psi_{\text{мин}} < \Psi_0 < \Psi_{\text{макс}}$ увеличивается, если при фиксированном значении параметра u возрастает фазовая скорость волны β_p . Обнаружена также немонотонность графиков $\Psi_{\text{мин}}(u)$, $\Psi_{\text{макс}}(u)$, наиболее существенная для сравнительно больших значений фазовой скорости β_p .

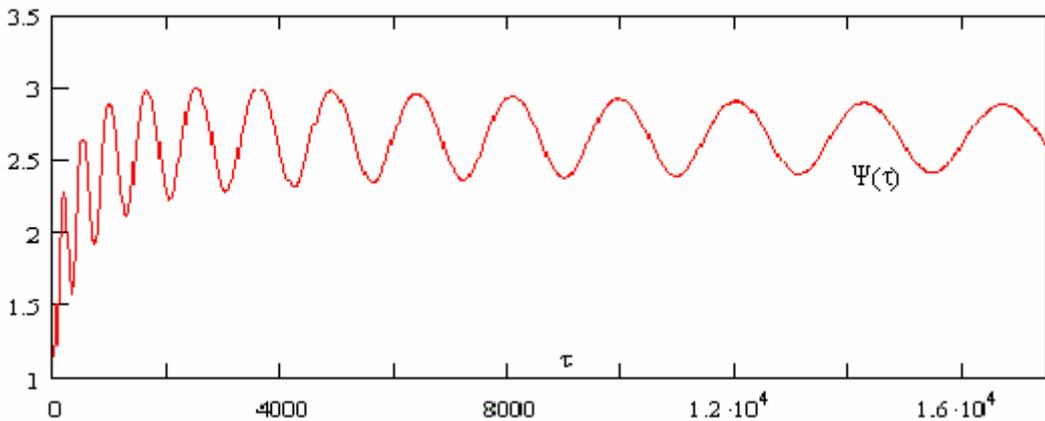


Рис. 1. Фаза волны на траектории заряда

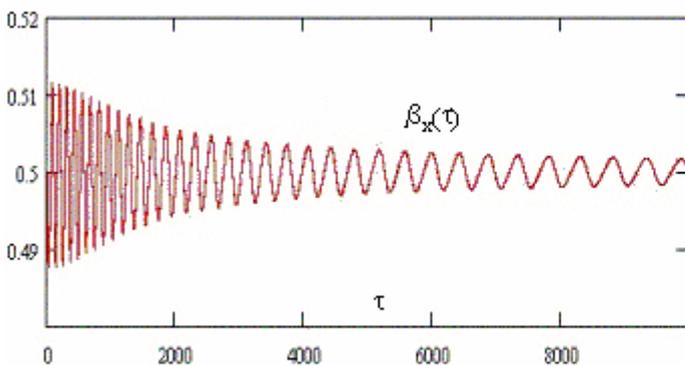


Рис. 2. Компонента безразмерной скорости волны $\beta_x(\tau)$

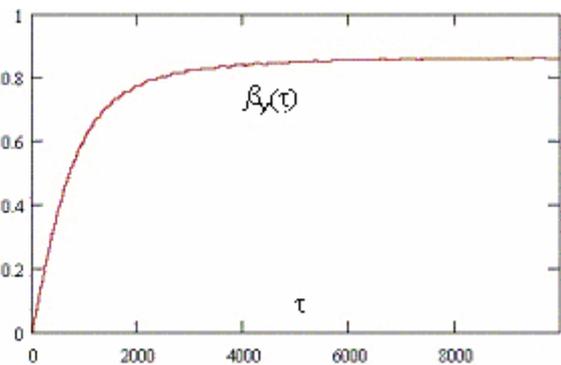


Рис. 3. Компонента безразмерной скорости волны $\beta_y(\tau)$

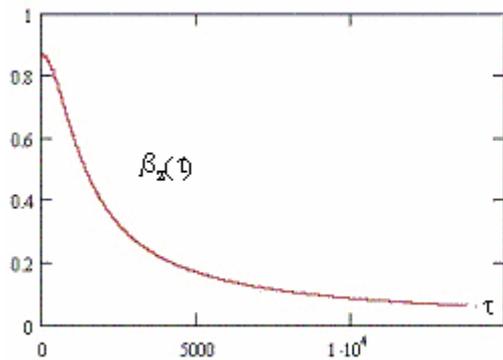


Рис. 4. Компонента безразмерной скорости волны $\beta_z(\tau)$

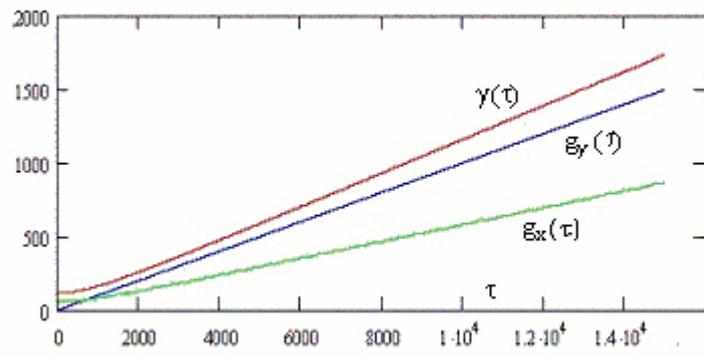


Рис. 5. Релятивистский фактор $\gamma(\tau)$ и компоненты безразмерного импульса частицы $g_x(\tau), g_y(\tau)$

Численные расчеты показали, что динамика фазы волны на траектории ускоряемой частицы внутри диапазона благоприятных для ускорения фаз подобна, но при выборе начальной фазы из середины интервала (Ψ_{\min}, Ψ_{\max}) амплитуда колебаний $\Psi(\tau)$ существенно меньше.

Заключение

Результаты проведенного выше анализа можно суммировать следующим образом. Во-первых, с учетом вихревой компоненты электрического поля волны, распространяющейся поперек внешнего магнитного поля, исследован захват заряженных частиц со скоростью, близкой к фазовой скорости волны, в режим неограниченного ускорения (серфинг зарядов на волнах). Во-вторых, численными расчетами нелинейного уравнения для фазы волны на траектории ускоряемой частицы изучены условия захвата зарядов в режим ультрарелятивистского ускорения в космической плазме, динамика характеристик заряда во времени. Получены диапазоны изменения начальных данных, в которых такое ускорение имеет место.

Литература

1. Ерохин Н.С. // Дифференциальные уравнения. 1970. Т.7. С.970.
2. Galeev A.A., R.Z. Sagdeev. Voprosy teorii plazmy, Moscow, Gosatomizdat, 1973, No 7, p.3
3. Shevchenko V.I., Sagdeev R.Z., V.L. Galinsky, M.V. Medvedev. Fizika Plazmy, 2003, v.29, No 7, p.588.
4. Moiseev N.N. Asymptotic methods of nonlinear mechanics, Moscow, Nauka, 1969, 379 p.